引用格式：王武，肖雨茹，岳奕含，等.MXenes量子点制备及应用进展[J].材料工程，2026，54(8)：168-179.
WANG Wu，XIAO Yuru，YUE Yihan，et al.Progress in preparation and application of MXenes quantum dots[J].Journal of Materials Engineering，2026，54(8)：168-179.

MXenes量子点制备及应用进展

王　武[1*]，肖雨茹[1]，岳奕含[2]，项惠珍[1]，李林泽[1]，王家旭[1]
（1 湖南工业大学 生物与医学工程学院，湖南 株洲 412007；2 湖南工业大学 科技学院，湖南 株洲 412008）

摘要：MXenes量子点凭借其优异的光电性能与表面活性特性，在多学科交叉领域展现出较好的应用潜力。本工作从制备工艺、应用场景、技术瓶颈及发展路径4个维度展开系统论述。对比分析自上而下剥离法与自下而上合成法的工艺特征及适用性。梳理其在能源存储与转换、生物传感与分子检测、精准医疗介入、环境治理及信息加密等领域的创新应用。未来，机器学习赋能的逆向材料设计将加速功能化MXenes量子点的开发进程，通过缺陷工程调控与核壳异质结构构建有望突破光吸收瓶颈，可降解生物电子器件的开发将拓展临床应用边界，而标准化毒性评估体系的建立则是实现医学转化的关键前提。随着材料基因组计划与柔性电子技术的深度融合，MXenes量子点有望在智能感知系统、个体化诊疗设备及人机交互界面等领域催生颠覆性技术变革，最终构建从基础材料创新到终端系统集成的全产业链创新生态。

关键词：MXenes；0维材料；量子限域效应；量子点；应用
doi：10.11868/j.issn.1001-4381.2025.000266　**CSTR**：32421.14.j.issn.1001-4381.2025.000266
中图分类号：O611.6　**文献标识码**：A　**文章编号**：1001-4381(2026)08-0168-12

Progress in preparation and application of MXenes quantum dots

WANG Wu[1*]，XIAO Yuru[1]，YUE Yihan[2]，XIANG Huizhen[1]，LI Linze[1]，WANG Jiaxu[1]
（1 College of Biological and Medical Engineering，Hunan University of Technology，Zhuzhou 412007，Hunan，China；
2 College of Science and Technology，Hunan University of Technology，Zhuzhou 412008，Hunan，China）

Abstract：MXene quantum dots (MQDs)，with their excellent photovoltaic and surface-active properties，have shown good potential for application in multidisciplinary fields. In this paper，we systematically discuss MXene quantum dots (MQDs) from four dimensions：preparation process，application scenarios，technological bottlenecks and development paths. The process characteristics and applicability of top-down stripping and bottom-up synthesis are compared and analyzed. The innovative applications in the fields of energy storage and conversion，biosensing and molecular detection，precision medical intervention，environmental governance and information encryption are also discussed. In the future，machine learning-enabled reverse material design will accelerate the development of functionalized MQDs，defect engineering modulation and core-shell heterostructure construction are expected to break through the bottleneck of light absorption，the development of degradable bioelectronic devices will expand the boundaries of clinical applications，and the establishment of a standardized toxicity assessment system is a key prerequisite for medical translation. With the in-depth integration of the materials genome project and flexible electronics technology，MQDs are expected to catalyse subversive technological changes in the fields of intelligent sensing systems，individualized diagnostic and therapeutic devices，and human-machine interaction interfaces，and ultimately build a whole industry chain innovation ecology from basic materials innovation to terminal system integration.

Key words：MXenes；0-dimensional material；quantum-limited effect；quantum dots；application

随着纳米科技的飞速发展，低维纳米材料因其独特的量子效应和可调控的物理化学性质，在能源、生物医学、环境治理等领域展现出革命性的应用潜力[1-3]。MXenes材料作为一类新兴的2D过渡金属碳/

氮化物，自问世以来便凭借其高导电性、优异的力学性能及丰富的表面化学性质，在储能器件、电磁屏蔽、催化等领域引发了广泛关注[4-6]。然而，传统MXenes材料的层状结构在一定程度上限制了其在微观尺度上的功能化设计与性能优化[7-9]。近年来，通过剥离或合成策略将MXene纳米片进一步降维至0D结构，所获得的MXenes量子点（MXenes quantum dots，MQDs）不仅完整保留了母体材料的优异特性，更因量子尺寸效应的引入，赋予其独特的光学、电学和磁学性能，为智能材料领域的发展开辟了全新的研究方向[10-12]。MQDs的量子限域效应显著增强了体系内部电子能级的量子化程度，使得载流子迁移率大幅提升，减少了电子-空穴复合概率，进而增强了发光效率[13-15]。此外，MQDs的小尺寸效应还实现了对带隙的精细调控，使其发射波长可覆盖更宽的光谱范围。同时，MQDs的高比表面积和表面活性，显著提升了其与周围环境的相互作用能力，增强了化学稳定性，并便于表面功能化修饰[16-18]。这一转变突破了传统层状MXenes的性能瓶颈，为MXenes在高性能光电器件，如发光二极管、光电探测器、生物成像及电化学传感等前沿领域的应用提供了新的可能性。此外，相较于碳点与钙钛矿量子点等0D纳米材料，MQDs在综合性能与应用潜力上也展现出独特优势。碳点虽具备生物相容性佳、制备成本低等特性，但其量子产率及发光稳定性常受限于表面缺陷态，且在导电性能上难以与MQDs媲美，限制了其在高性能光电器件中的进一步应用[19-21]。钙钛矿量子点虽以高荧光量子产率和窄发射带宽著称，但其对环境湿度、光照和氧气的极端敏感性导致稳定性问题突出，且重金属基毒性风险难以规避[22-24]。而MQDs不仅继承了MXenes家族的高导电性和化学稳定性，其表面可调控的官能团还赋予其更强的环境适应性和生物相容性。尤其在需要高灵敏度、长寿命及低毒性的生物成像和电化学传感领域，MQDs凭借其多功能集成性成为更具潜力的候选材料。尽管MQDs在多学科交叉领域展现出巨大的应用前景，但其规模化制备与应用仍面临诸多挑战。当前，如何实现低成本、高质量的批量合成，如何精确控制量子点的尺寸分布与表面性质，以及如何平衡生物相容性与功能化需求，仍是制约其实际应用的关键瓶颈[25-27]。与此同时，MQDs在复杂环境中的长期稳定性、潜在毒性评估及多功能复合材料的开发，亦需进一步深入探索[28-30]。

本工作旨在系统综述MQDs的制备方法与应用研究进展。分析不同制备策略的优缺点及适用场景。聚焦其在能源存储与转换、生物医学、光电子器件及环境治理等领域的典型应用，揭示量子尺寸效应与表面化学性质对性能的调控机制。最后，结合当前研究现状，展望MQDs在多功能集成、智能化响应及产业化应用中的发展方向。通过本工作的阐述，期望为MQDs的基础研究与应用开发提供理论参考与技术借鉴，推动这一新兴纳米材料在智能材料领域的创新与突破。

1　制备方法

1.1　自下而上法

MQDs的自下而上制备方法是一种从原子或分子级别出发，通过化学合成直接构建量子点的技术路线，其核心在于通过精确控制反应条件与前驱体组成，实现量子点尺寸、形貌及表面性质的定制化合成[31-33]。该方法主要包括熔盐法、热解法和微波法等技术路径。

熔盐法作为一种高效制备MQDs的方法，通过构建高温液态反应环境实现了对量子点形貌与性能的精准调控。该方法以无机盐类作为反应介质，将前驱体加热至盐类熔点以上，利用熔融盐的离子传导特性促进前驱体分解与量子点成核[34-35]。如图1(a)所示，Cheng等[36]采用乙酰丙酮酸钼与蔗糖作为钼源和碳源，在NaCl熔盐体系中通过热解-碳化耦合过程，成功合成出平均粒径仅2～3 nm的Mo_2C量子点，并同步构建了MQDs与碳纳米片的复合结构[37]。该方法通过盐类介质的选择与反应温度调控，为MQDs的规模化制备及结构功能一体化设计提供了新思路。热解法作为一种高效的MQDs制备策略，通过精确调控前驱体的热解行为实现量子点的可控合成[37-38]。如图1(b)所示，Lin等[39]以Mo-$(NCNH)_x$为前驱体，在氩气惰性气氛保护下，利用高温诱导的前驱体碳化-相变过程，直接生成结构为MoC_{1-x}@C的量子点/碳基杂化材料。微波法作为一种MQDs制备技术，通过高效能量耦合机制实现了纳米结构的精准调控[40-41]。如图1(c)所示，Wan等[42]通过微波场与前驱体的非热效应协同作用，突破传统高温渗碳工艺易导致颗粒团聚的技术限制，实现了碳化物相的瞬时成核与生长控制，有效抑制了纳米颗粒的奥斯瓦尔德熟化过程，在环境条件下诱导的快速燃烧反应，成功合成出尺寸可调的MQDs。这种微波辅助合成策略不仅大幅缩短了制备周期，更通过过程强化实现了量子点尺寸分布的窄化调控，为设计高性能MQDs基电催化剂提供了新方法，使其在能源转换器件的小型化与集成化领域展现出重要应用潜力。可以看出，自下而上法可精准调控

MQDs尺寸，显著影响其性能。然而，该方法面临产业化瓶颈，如设备要求苛刻、产率低且成本高、表面缺陷与长期稳定性需优化。尽管如此，随着反应器设计与原位表征技术的进步，自下而上法有望突破现有瓶颈，为MQDs的应用产业化提供坚实的材料基础。

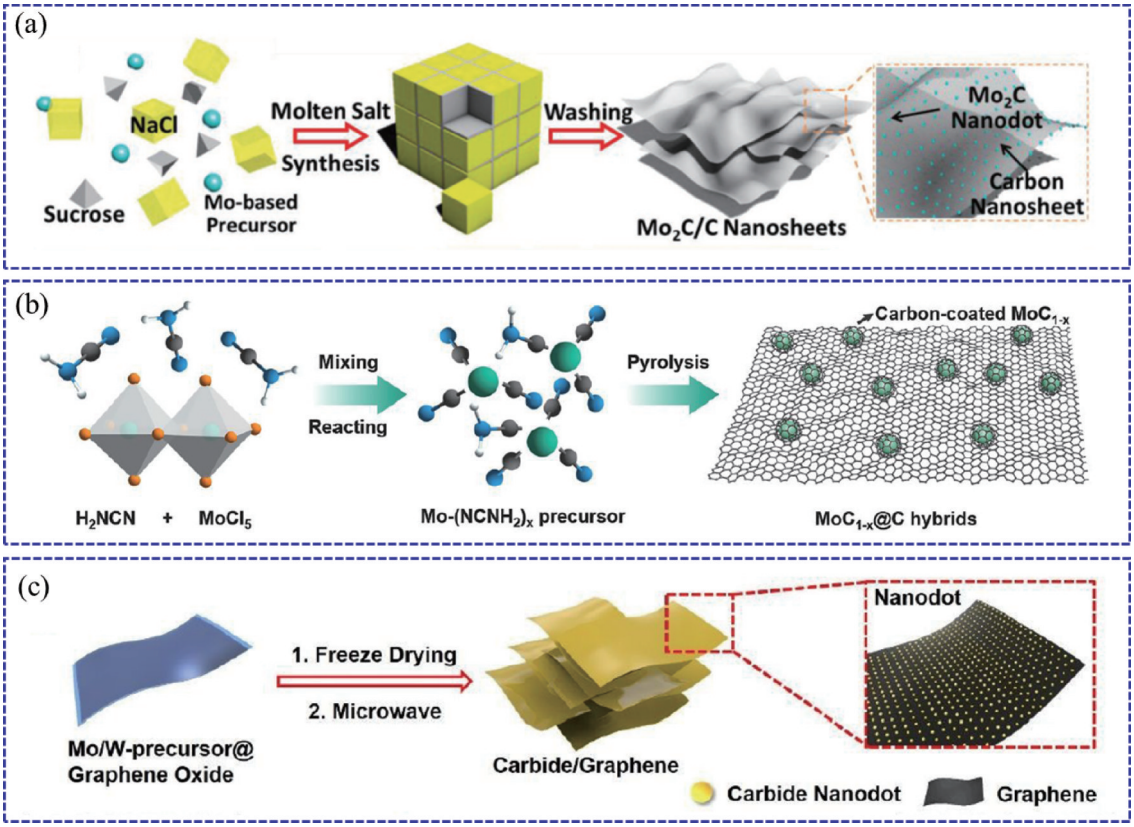


图1 自下而上法制备MQDs示意图 (a)熔盐法[36]；(b)热解法[39]；(c)微波法[42]

Fig.1 Schematic diagrams of MQDs prepared by bottom-up method (a)molten salt method[36]; (b)pyrolysis method[39]; (c)microwave method[42]

1.2 自上而下法

MQDs的自上而下制备法主要以MXenes层状材料为起点，通过物理或化学手段逐层剥离或切割，最终获得尺寸小于10 nm的量子点[15,43]。该方法利用MXenes母体材料的结构特性，通过破坏层间作用力实现纳米化，同时保留其高导电性、亲水性及表面官能团等固有优势。MQDs制备的自上而下法主要包括水热法、溶剂热法、微爆炸法、机械剥离法和超声处理等方法。

水热法制备MQDs具有反应条件温和、制备纯度高和尺寸均一等优点[44-46]。如图2(a)所示，Huang等[47]通过水热条件下对前驱体的精准调控，实现了Nb_2C量子点的尺寸控制及表面态修饰，所制备的量子点尺寸均一且分散性良好，为后续构建异质结构提供了理想构筑基元。该研究不仅展示了水热法在制备MQDs及构建异质结构方面的工艺优势，更为开发高效、稳定的光催化剂，实现海水资源化利用生产H_2O_2提供了创新思路。溶剂热法通过高温高压的溶剂环境，来实现MQDs的高效制备。

水热法仅以水为溶剂，适用于氧化物或对水不敏感的材料。而溶剂热法使用有机溶剂，可合成对水敏感的化合物，具有反应温度更高、适用材料范围更广等特点，能通过溶剂的物理化学性质实现对其光学特性、尺寸分布及量子产率的精准调控[48]。如图2(b)所示，Xu等[49]以$Ti_3C_2T_x$纳米片为前驱体，利用溶剂热处理过程中溶剂的极性、沸点及氧化能力的差异，诱导MXene片层发生可控的剥离与功能化。此外，该方法揭示了MQDs与过硫酸盐体系的电化学发光特性，证实溶剂的综合效应是决定MQDs光电性能的关键因素，为设计特定功能量子点提供了溶剂工程策略。超声法通过高频声波空化效应可实现MQDs的高效、绿色合成[50]。如图2(c)所示，Yu等[51]在室温下利用超声能量直接剥离并切割MXene层状材料获得MQDs。该方法摒弃了传统HF蚀刻工艺，采用无氟路线，显著简化了制备流程并提升了操作安全性。所得MQDs表面天然修饰了铝氧阴离子基团，能赋予其近红外区域较高的消光系数及光热转换效率。这种超声诱导

的表面功能化机制不仅增强了MQDs的光吸收能力，还使其在光声成像引导的肿瘤光热治疗中展现出广阔应用前景。机械剥离法作为一种物理玻璃方法，能有效实现MQDs的高效、无损制备[52-54]。如图2(d)所示，Alijani等[55]在无需化学蚀刻剂和有机碱情况下，利用高频声波在室温下直接机械剥离多层$Ti_3C_2T_x$ MXene，成功制备出MQDs，显著减少了量子点的氧化并完整保留了材料本征性质。与传统的水热法相比，该工艺通过声场调控的横向切割机制，可精准控制量子点尺寸与层数，所得MQDs纯度极高。该方法为开发高纯度、功能化的MQDs提供了绿色合成路径，在生物传感与能量存储领域展现出广阔应用前景。微爆炸法可通过瞬时能量释放实现MQDs的快速合成与结构调控，是一种高效制备MQDs的方法[28]。如图2(e)所示，Li等[56]利用微爆炸法制备了未氧化的MQDs。该方法避免了传统工艺中MQDs易氧化的难题，确保了量子点的纯度与稳定性。所得MQDs展现出优异的生物相容性，对癌细胞具有显著的抑制和杀伤作用，为开发安全可靠的MXene基肿瘤催化治疗材料提供了新策略。

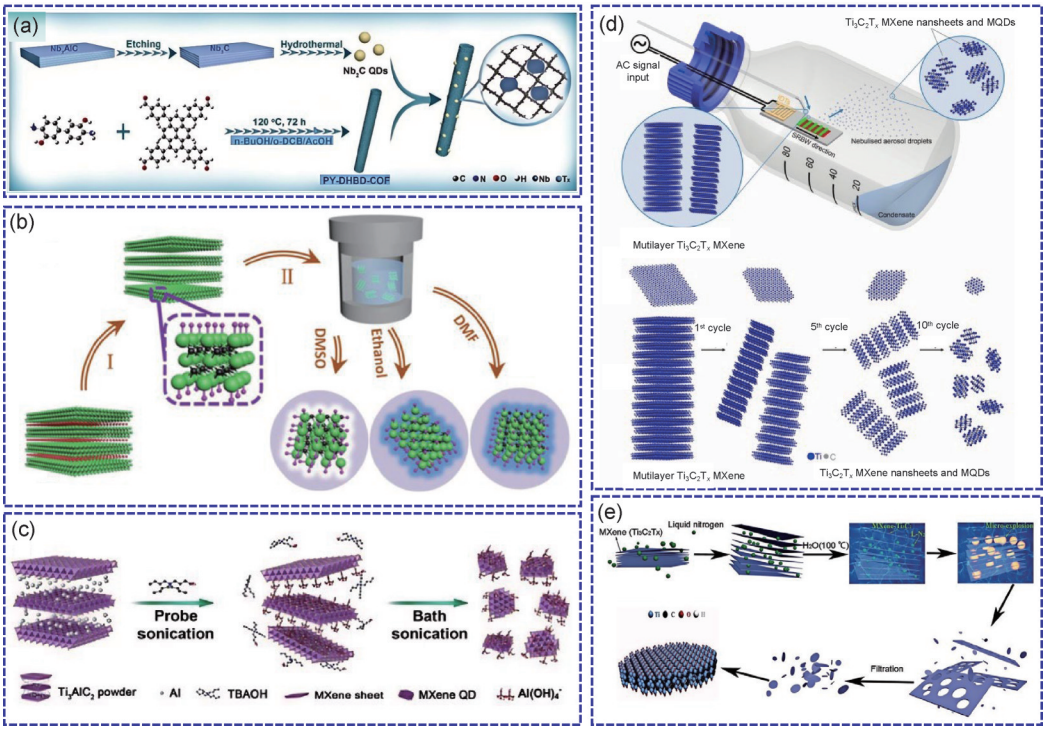


图2　自上而下法制备MQDs示意图

(a)水热法[47]；(b)溶剂热法[49]；(c)超声法[51]；(d)机械剥离法[55]；(e)微爆炸法[56]

Fig.2　Schematic diagrams of MQDs prepared by top-down method

(a)hydrothermal method[47]; (b)solvothermal method[49]; (c)ultrasonic method[51]; (d)mechanical stripping method[55]; (e)micro-explosion method[56]

自下而上法通过化学合成从原子/分子级别构建量子点，包括熔盐法、热解法及微波法，强调对量子点尺寸、形貌及表面性质的精准调控，适用于能源转换与电催化领域，但面临设备成本高、产率低等挑战。自上而下法则以MXenes层状材料为起点，通过物理或化学剥离/切割获得量子点，如水热法、溶剂热法、超声法、机械剥离法及微爆炸法，该方法保留了MXene母体材料的优异性能，适用于光催化、生物传感及肿瘤治疗等领域，但需解决产率与工艺稳定性问题。表1[28,34-56]系统梳理了MQDs的两种主要制备方法，为其制备方法选择及性能优化提供了全面参考。

2　应用

2.1　能源存储与转换

MQDs凭借其优异的高导电性及丰富的表面官能团，在能源存储与转换领域展现出显著的应用潜力[57-59]。MQDs继承了MXene材料的高导电性，确保了电荷的快速传输。此外，丰富的表面官能团为MQDs的功能化改性提供了可能，如通过掺杂、缺陷工程等手段进一步优化其电化学性能。在电池领域，MQDs展现出了显著的应用潜力和优势。如图3(a)所示，Chen等[60]利用MQDs调控钙钛矿/电子传输层界面和钙钛矿层，并引入纳米晶改善空穴传输层，成

表 1 MQDs的制备方法及反应条件

Table 1 Preparation of MQDs and reaction conditions

Technology path	Preparation method	Feature	Reference
Bottom-up	Molten salt method	High temperature liquid environments (above the melting point of salts)	[34-36]
	Pyrolysis method	Inert atmosphere induced at high temperatures	[37-39]
	Microwave method	Microwave field assist	[40-42]
Top-down	Hydrothermal method	Aqueous solution environment under high temperature and pressure	[44-47]
	Solvothermal method	Organic solvent environment under high temperature and pressure	[48-49]
	Ultrasonic method	Cavitation effect of high-frequency acoustic waves at room temperature	[50-51]
	Mechanical stripping method	Physical stripping at room temperature	[52-55]
	Micro-explosion method	Instantaneous energy release	[28,56]

功地将钙钛矿太阳能电池的光电转换效率提升至21.64%,且无迟滞效应。这不仅体现了MQDs在优化电池能级结构、提高导电性和电子传输能力方面的性能,还显著增强了器件在空气环境和连续光照下的稳定性,有望推动钙钛矿太阳能电池等新能源技术的商业化进程。

MQDs在能源存储领域也展现出优异的应用潜力,在微型超级电容器(micro super capacitor,MSC)领域取得较好的进展。如图3(b)所示,Liu等[27]通过工程策略,结合氮掺杂、缺陷引入及官能团调控,制备出富缺陷氮掺杂MQDs基MSC,实现了高体积电容及10000次循环后近乎无衰减的稳定性,推动了MQDs在可穿戴设备、微型电子器件等领域的能源系统小型化与集成化领域的应用。此外,MQDs在柔性透明能源存储器件领域也有很强的应用潜力。如图3(c)所示,Yuan等[61]通过飞秒激光光化学原位合成技术,成功将MQDs均匀负载于激光还原氧化石墨烯表面,制备出兼具超高透明度与优异电化学性能的超级电容器。该器件具有高能量密度和电容值,且在12000次循环后仍保持97.6%的容量,同时具备优异的柔性,为透明储能器件提供了新的材料解决方案。然而,MQDs在能源存储与转换领域的应用仍面临一些挑战。其表面改性方法有待丰富,可通过引入不同的官能团或构建核壳结构,以进一步提升其电化学稳定性和能量密度。

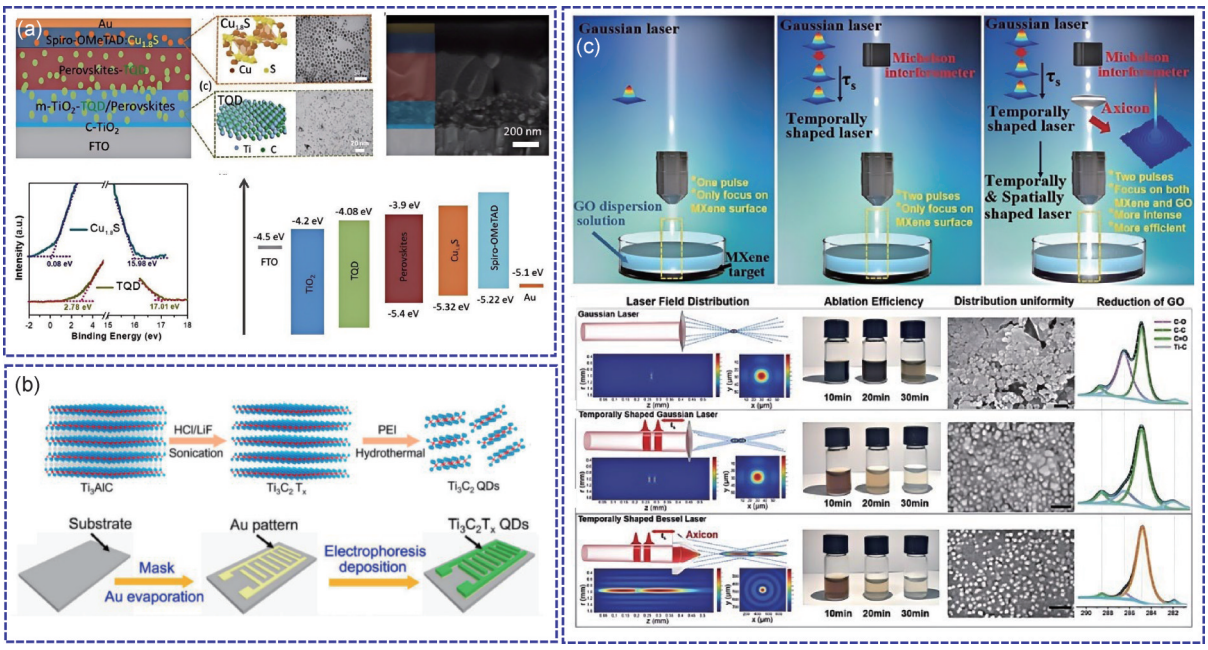


图3 MQDs在能源存储与转换领域的应用示意图

(a)太阳能电池[60];(b)微型超级电容器[27];(c)高透明超级电容器[61]

Fig.3 Schematic diagrams of MQDs application in energy storage and conversion field

(a)solar cells[60];(b)micro-supercapacitors[27];(c)highly transparent supercapacitors[61]

2.2 生物传感与分子检测

MQDs的高比表面积和丰富的表面官能团提供了大量的活性位点,有利于与目标分子的相互作用,从而提高检测灵敏度[62-63]。其优异的导电性、可调谐的

光学性能以及良好的生物相容性，成为生物传感与分子检测领域的研究热点。MQDs在开发高灵敏度、高选择性的生物传感器方面取得了显著进展。如图4(a)所示，Li等[64]基于MQDs开发了一种新型的表面等离子体耦合电化学发光生物传感器，用于定量检测miRNA。MQDs作为传感器的发光材料，不仅具有MXenes材料独特的催化性能、良好的生物相容性和高导电性，而且通过氮取代碳增强了Ti—N键，从而显著提高了物理和电子性能，使其发光性能和催化活性得到有效提升。MQDs还可以用于细菌的监测，在开发具有多重功能的智能纺织品方面具有重要应用价值[65]。如图4(b)所示，Deng等[66]将MQDs与高效抗菌剂结合，在纤维表面构建有机-无机杂化层，并通过金属亲和配位固定Ni^{2+}，最终负载含邻苯二酚的抗菌化合物，制备出MQDs基改性纺织品。该材料不仅表现出对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌超过99.99%的杀菌效率，还通过荧光恢复特性实现了对病原体的差异响应监测，为开发智能医疗纺织品、实时感染预警系统等提供了全新策略，展现了MQDs在生物传感与公共卫生领域的巨大潜力。

基于MQDs优异的光学、电学和化学性质，有望将其应用于分子检测中，实现对多种目标分子的准确测定。如图4(c)所示，Wan等[67]通过熔融沉积成型技术构建了3D打印纳米碳电极，经MQDs修饰后，能够准确测定多巴胺的浓度范围，检测限低至3 nmol/L，并成功应用于真实样品中多巴胺的检测。如图4(d)所示，Lin等[68]利用MQDs的大范围光吸收能力和优异化学稳定性，通过配位作用自组装形成发射蓝色荧光的复合探针。当溶液中存在2,6-吡啶二羧酸(DPA，一种炭疽杆菌孢子的生物标志物)时，荧光颜色发生变化，从而实现对DPA的可视化检测。此外，通过制备MQDs基荧光试纸，结合智能手机拾色软件分析，构建出可分析DPA浓度的即时检测技术。然而，MQDs在传感和检测领域也面临一些挑战，如制备过程中可能涉及有毒化学物质，对环境造成潜在污染，以及MQDs在生物体内的长期安全性和毒性尚需进一步评估等。相信随着研究的深入和技术的突破，MQDs有望在该领域发挥更加重要的作用。

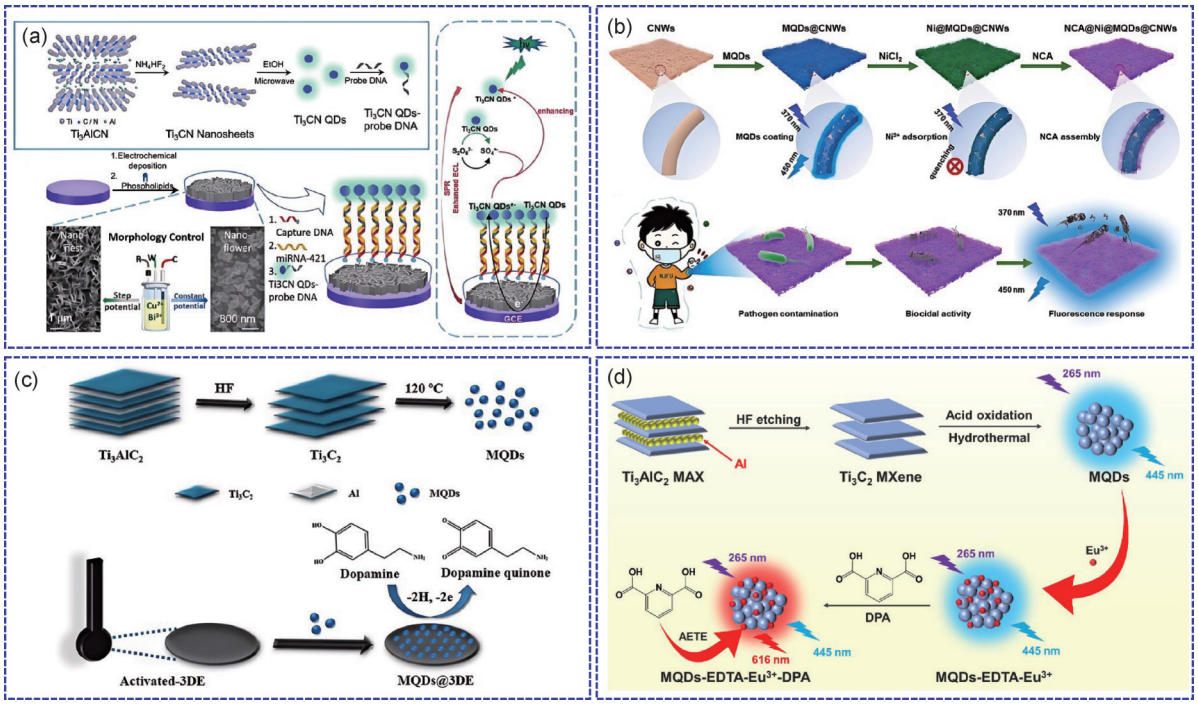


图4　MQDs在生物传感与分子检测领域的应用示意图

(a)检测miRNA[64]；(b)检测细菌[66]；(c)检测多巴胺[67]；(d)检测2,6-吡啶二羧酸[68]

Fig.4　Schematic diagrams of the application of MQDs in the field of biosensing and molecular detection

(a)miRNA detection[64]; (b)bacteria detection[66]; (c)dopamine detection[67]; (d)2,6-pyridinedicarboxylic acid detection[68]

2.3　疾病治疗

MQDs在疾病治疗领域展现出巨大的应用潜力，尤其在药物递送和光热治疗方面取得了显著进展，成为生物医学领域的研究热点[69-70]。在药物递送领域，MQDs凭借其高比表面积、优异的生物相容性和可调控的表面性质，成为理想的药物载体。如图5(a)所示，Qin等[71]将MQDs与鼠李糖乳杆菌(LG)和FeS结合，制备了益生菌生物异质结(probiotic bioheterojunc-

tion，P-bioHJ），能有效用于抗生物膜治疗和伤口再生。P-bioHJ利用LG的代谢过程靶向糖类，有效破坏生物膜的三维细胞外聚合物（extracellular polymers，EP）结构，显著增强了抗菌剂的渗透性。同时，在近红外光（near infrared，NIR）照射下，P-bioHJ中的MQDs能够产生活性氧和热能，通过光热疗法和光动力疗法的协同作用，显著提高了杀菌效率，有效对抗了顽固的细菌生物膜。该体系中MQDs与益生菌的有机结合，实现了EP降解与光动力治疗杀菌的协同，为慢性伤口和生物膜相关感染的治疗提供新的策略和方法。MQDs在肿瘤治疗领域同样展现出独特的创新应用，在开发高效、低毒的光热-光动力联合疗法方面具有显著潜力。如图5（b）所示，He等[72]将MQDs与银纳米颗粒复合，构建出具有光热-光动力双模态治疗功能的纳米平台，在670 nm激光照射下能显著抑制肿瘤生长。其中，MQDs优异的光热性能和光稳定性使其在光热疗法中具有独特优势，能够实现精准、无创的消融肿瘤，为开发高效、低毒的联合疗法提供独特解决方案。MQDs不仅继承了MXenes材料优异的生物相容性和表面可修饰性，还有望通过量子限域效应进一步增强其生物活性和与亚细胞相互作用，在开发高效、低毒的免疫调节策略方面展现出显著的应用潜力。如图5（c）所示，在治疗异体移植血管病变中，$Ta_4C_3T_x$ MQDs通过静脉注射可成功应用于体内模型，显著减少移植组织内的免疫细胞浸润和结构变性[73]。该MQDs能够自发内化到内皮细胞中，并通过调节T细胞的活化，降低其免疫原性，从而有效抑制同种异体移植物血管病变的早期发展。

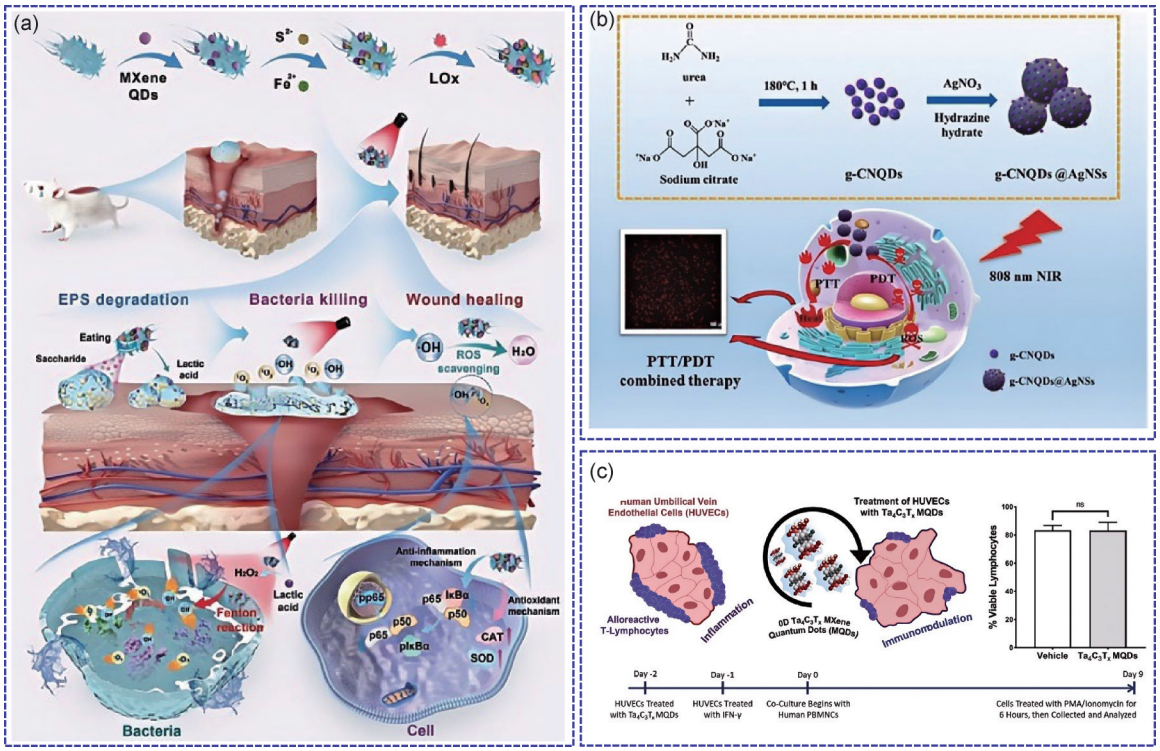


图5 MQDs在疾病治疗领域的应用示意图

（a）抗生物膜治疗和伤口再生[71]；（b）有光热-光动力双模态治疗功能的MQDs基平台[72]；（c）异体移植血管病治疗[73]

Fig.5 Schematic diagrams of MQDs applications in the field of disease treatment

(a)anti-biofilm therapy and wound regeneration[71]; (b)MQDs-based platform with photothermal-photodynamic bimodal therapeutic function[72]; (c)xenograft vasculopathy therapy[73]

2.4 水处理

在水处理领域，MQDs优异的光电性能和表面特性使其在离子传感和光催化降解方面具有独特优势，能够实现高灵敏度的水环境监测和高效的环境治理[74-76]。如图6（a）所示，Cheng等[77]通过超声方法制备了Fe_3O_4@MQDs杂化材料，该材料显示出较强的类过氧化物酶活性，能够有效分解H_2O_2生成活性·OH，从而实现对六价铬的高效、灵敏检测。基于Fe_3O_4@MQDs的催化活性，研究人员建立了高效、简便的铬（Ⅵ）检测比色分析体系，检测限低至0.26 μmol/L，为饮用水水源地的安全监测提供了新的技术手段。此外，MQDs也可以用于重金属离子Mn（Ⅶ）的检测和清除。如图6（c）所示，Gu等[78]通过水热法处理Ti_3C_2 MXene，制备了具有多种官能团的MQDs。

进一步利用 MQDs 与 Mn(Ⅶ)发生的氧化还原反应，使荧光猝灭和Mn(Ⅶ)的消除，成功构建了Mn(Ⅶ)荧光探针，检测限低至 5.2 nmol/L。该工作展示了MQDs在重金属离子检测方面的高灵敏度和选择性，还揭示了其在环境修复领域的潜力。

除了离子的检测与去除，在环境领域，MQDs还能应用于海水淡化过程中的膜污染修复。如图6(b)所示，Zhang 等[79]制备出 N 掺杂 MQDs(NMQDs)/ZnO基膜，利用NMQDs的上转换特性，将可见光转换为紫外线，激发ZnO形成电子/空穴对，有效降解有机物污染物。同时，NMQDs的加入提高了ZnO的电荷分离效率，增强了膜的光吸收能力。这种协同作用使得被海水蛋白质污染的膜在光照后，透湿率恢复至初始膜的 99.8%，显著延长了膜的使用寿命，有望在海水淡化、膜污染控制和水处理等方面发挥更加重要的作用，为解决全球淡水短缺问题提供可行的途径。在环境修复领域，MQDs还能应用于抗生素污染物的降解。如图6(d)所示，Gao 等[80]通过溶热法将 MQDs 与 gC_3N_4、BiOBr结合，构建了高效的异质结光催化剂。在这种结构中，MQDs不仅加速了电子传输，还促进了光生电荷选择性生成单线态氧，从而显著提高了四环素的降解效率，为有效去除水中的有机污染物提供了新的方法。

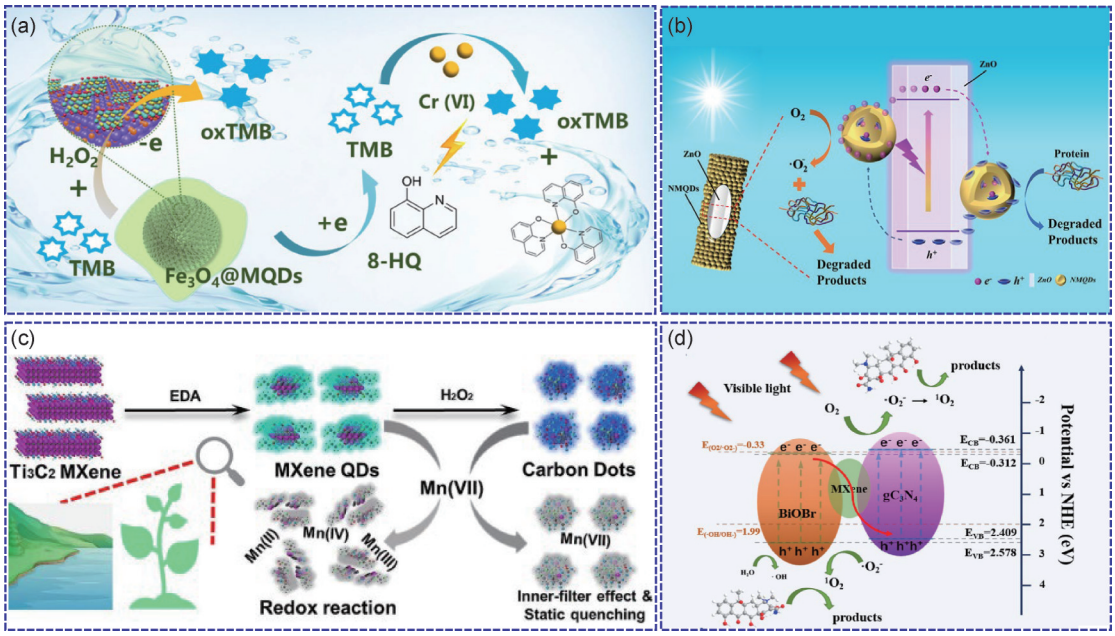


图6　MQDs在水处理领域的应用示意图

(a)铬(Ⅵ)检测[77]；(b)用于海水淡化过程中的膜污染修复[79]；(c)Mn(Ⅶ)检测[78]；(d)促进四环素的降解[80]

Fig.6　Schematic diagrams of application MQDs in the field of water treatment

(a)MQDs for chromium(Ⅵ) detection[77]; (b)membrane contamination remediation in seawater desalination process[79]; (c)Mn(Ⅶ) detection[78]; (d)promoting degradation of tetracycline[80]

2.5　其他前沿领域

除了以上介绍的相关应用，MQDs在其他前沿领域，如信息安全、气体和生物信号传感等领域也展现出巨大的应用潜力。在信息安全领域，MQDs可被应用于构建光电忆阻器，从而实现加密、解密与图像识别功能的单片集成。如图7(a)所示，Huang 等[81]利用MQDs的光电特性，设计了一种在电控下表现出稳定挥发性和非挥发性功能的多功能器件。通过编程控制光信号和电信号，该器件能够灵活切换加密、解密和图像识别模式，器件利用率显著提升。基于MQDs的光电忆阻器在图像识别技术的辅助下，能够有效减少需要加密的数据量，提升信息传输速度，为解决信息安全问题提供可行的策略。MQDs在开发高性能、高选择性的气体传感器方面也具有显著应用潜力。如图7(b)所示，Zhao 等[82]通过理论计算指导材料设计与结构优化，开发了基于硼烯-BC2N量子点的异质结的高性能气体传感器。MQDs的引入显著增强了硼烯对 NO_2 的吸附强度，并诱导了分子与异质结之间最大程度的电荷转移和电子性质改变，从而实现了对 NO_2 的高灵敏度和选择性检测。该技术有望在气体传感、大气环境监测和公共安全等领域发挥更加重要的作用，为解决全球性的气体污染和安全问题提供新的思路。此外，MQDs在柔性传感器领域展现出独特的创新应用，尤其可用于开发高性能、生物相容性优异的健康监测设备。如图7(c)所示，Sun 等[83]通过将MQDs与西瓜皮结合，制备了具有三维多孔网络结构

的MQDs/西瓜皮气凝胶传感器。该传感器表现出优异的压敏响应和良好的稳定性，能够通过蓝牙模块将传感信号实时显示在手机上，为健康监测提供了便捷、高效的解决方案。

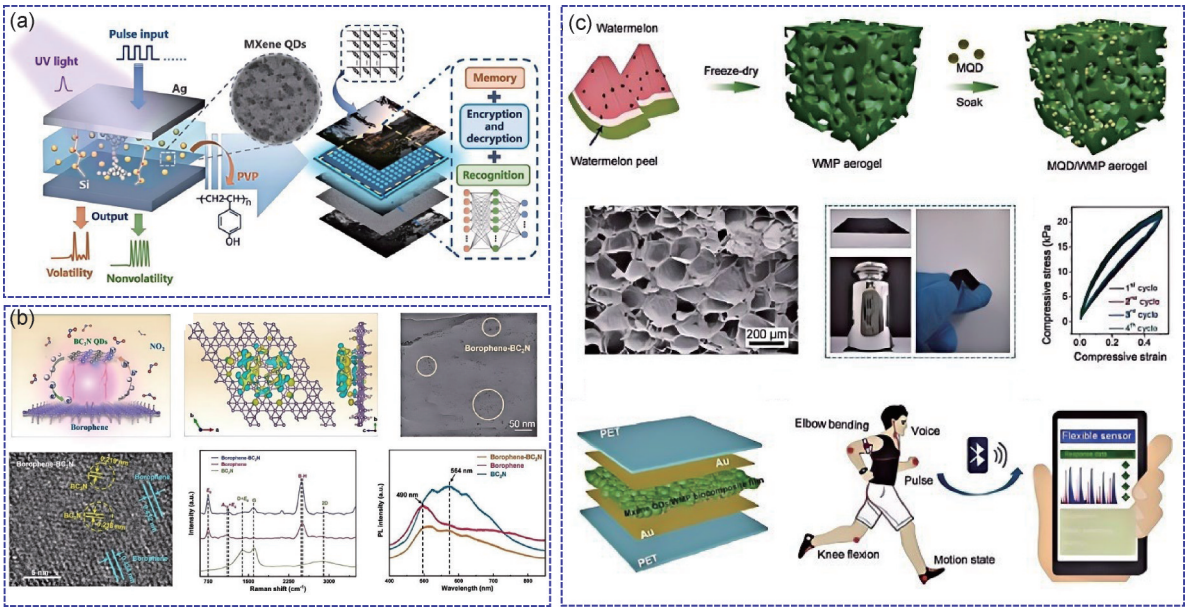


图7 MQDs在其他前沿领域的应用示意图

(a)信息安全[81]；(b)气体传感[82]；(c)生物信号传感[83]

Fig.7 Schematic diagrams of application of MQDs in other cutting-edge fields

(a)information security[81]; (b)gas sensing[82]; (c)biosignal sensing[83]

3 结束语

本工作系统综述了MQDs的制备方法及其在能源存储与转换、生物传感与分子检测、疾病治疗、环境保护和信息安全等前沿领域的最新应用进展，深入探讨了其作为新兴纳米材料在提升器件性能和实现功能集成方面的独特优势。尽管MQDs的研究已取得显著突破，但其规模化应用仍面临多重挑战。(1) 制备工艺方面，需进一步优化产率与成本控制，解决量子点团聚与稳定性衰减问题。(2) 性能优化层面，需深入揭示量子限域效应与界面相互作用机制，突破电荷传输效率与光吸收范围的瓶颈。同时，结合“机器学习赋能的逆向设计”策略，通过高通量计算与机器学习算法加速发现具有特定功能的量子点结构，实现性能参数的精准调控[84-85]。(3) 应用拓展方面，需加强生物毒理学研究，完善临床转化标准体系，特别是在植入式医疗器件和长期在体监测场景中的安全性验证。(4) 此外，通过“缺陷工程调控”手段对MQDs表面缺陷进行可控修饰，以增强其生物相容性并降低潜在毒性风险[31]。

随着材料基因组计划与人工智能技术的融合，MQDs的研发将迈向智能化设计与精准制造的新阶段。通过高通量计算筛选与机器学习优化，可加速发现具有特定功能的量子点结构。结合3D/4D打印技术，有望实现MQDs基功能器件的个性化定制与按需制造。在交叉学科领域，MQDs与生物分子、聚合物的杂化体系将推动智能响应型药物递送系统和仿生传感界面的发展。与柔性电子技术的深度融合，则可能催生自修复型电子皮肤、脑机接口等颠覆性技术。通过建立产学研用协同创新机制，加强标准制定与伦理规范建设，MQDs有望在环境治理、精准医疗和人机交互等领域引发技术革命，最终实现“材料赋能未来”的战略愿景。

参考文献

[1] Amarnath C A, Nanda S S, Papaefthymiou G C, et al. Nanohybridization of low-dimensional nanomaterials: synthesis, classification, and application[J]. Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences, 2013, 38(1): 1-56.

[2] Paras, Yadav K, Kumar P, et al. A review on low-dimensional nanomaterials: nanofabrication, characterization and applications [J]. Nanomaterials, 2023, 13(1): 160.

[3] Gupta D, Varghese B S, Suresh M, et al. Nanoarchitectonics: functional nanomaterials and nanostructures: a review [J]. Journal of Nanoparticle Research, 2022, 24(10): 196.

[4] Naguib M, Barsoum M W, Gogotsi Y. Ten years of progress in the synthesis and development of MXenes [J]. Advanced Materials, 2021, 33(39): 2103393.

[5] 王敬枫,康辉,成中军,等. $Ti_3C_2T_x$ MXene基电磁屏蔽材料的研究进展[J].材料工程,2021,49(6):14-25.
Wang J F,Kang H,Cheng Z J,et al.Research progress in $Ti_3C_2T_x$ MXene- based electromagnetic interference shielding material[J].Journal of Materials Engineering,2021,49(6):14-25.

[6] 王武,邵春阳,蔡天骄,等.MXene基形状记忆复合材料研究进展[J].材料工程,2025,53(6):74-86.
Wang W,Shao C Y,Cai T J,et al.Research progress in MXene-based shape memory composites[J].Journal of Materials Engineering,2025,53(6):74-86.

[7] Gogotsi Y. The future of MXenes [J]. Chemistry of Materials, 2023,35(21):8767-8770.

[8] Wei Y,Zhang P,Soomro R A,et al.Advances in the synthesis of 2D MXenes[J].Advanced Materials,2021,33(39):2103148.

[9] Salim O,Mahmoud K A,Pant K K,et al.Introduction to MXenes: synthesis and characteristics[J].Materials Today Chemistry,2019,14:100191.

[10] Motalebnejad-Mamaqani A, Babazadeh-Mamaqani M, Roghani-Mamaqani H, et al.*In situ* visualization of polymer solution phase transition using photoresponsive tracers and Förster resonance energy transfer enabled by MXene quantum dots[J].Materials Today Chemistry,2025,45:102670.

[11] Sun T D, Tang M L, Shi Y T, et al. MXenes quantum dots for biomedical applications: recent advances and challenges [J]. The Chemical Record,2022,22(6):e202200019.

[12] Shao B B,Liu Z F,Zeng G M,et al.Two-dimensional transition metal carbide and nitride (MXene) derived quantum dots (QDs): synthesis,properties,applications and prospects[J].Journal of Materials Chemistry A,2020,8(16):7508-7535.

[13] Lin C X,Song X H,Ye W L,et al.Recent progress in optical sensors based on MXenes quantum dots and MXenes nanosheets[J]. Journal of Analysis and Testing,2024,8(1):95-113.

[14] Sariga A M B,Kumar S,Rajeev R,et al.New horizons in the synthesis, properties, and applications of MXene quantum dots[J]. Advanced Materials Interfaces,2023,10(5):2202139.

[15] Sun J X,Zhang S P,Alomar M,et al.Recent advances in the synthesis of MXene quantum dots[J].The Chemical Record,2023,23(6):e202200268.

[16] Deng H,Hui Y X,Zhang C,et al.MXene-derived quantum dots based photocatalysts: synthesis, application, prospects, and challenges[J].Chinese Chemical Letters,2024,35(6):109078.

[17] Liu Y H,Zhang W,Zheng W T.Quantum dots compete at the acme of MXene family for the optimal catalysis[J].Nano-Micro Letters,2022,14:158.

[18] Jiang B W,Yang T,Wang T T,et al.Edge stimulated hydrogen evolution reaction on monodispersed MXene quantum dots[J]. Chemical Engineering Journal,2022,442:136119.

[19] Liu H X,Zhong X,Pan Q,et al.A review of carbon dots in synthesis strategy [J]. Coordination Chemistry Reviews, 2024, 498: 215468.

[20] Liu Y M,Roy S,Sarkar S,et al.A review of carbon dots and their composite materials for electrochemical energy technologies[J]. Carbon Energy,2021,3(5):795-826.

[21] Wang B Y,Cai H J,Waterhouse G I N,et al.Carbon dots in bioimaging,biosensing and therapeutics:a comprehensive review[J]. Small Science,2022,2(6):2200012.

[22] Bai Y,Hao M M,Ding S S,et al.Surface chemistry engineering of perovskite quantum dots:strategies,applications,and perspectives [J].Advanced Materials,2022,34(4):2105958.

[23] Huang C Y,Li H C,Wu Y,et al.Inorganic halide perovskite quantum dots:a versatile nanomaterial platform for electronic applications[J].Nano-Micro Letters,2023,15:16.

[24] Wu X G,Ji H L,Yan X L,et al.Industry outlook of perovskite quantum dots for display applications[J].Nature Nanotechnology,2022,17(8):813-816.

[25] Nie J L,Niu B Q,Wang Y J,et al.Multi-functional MXene quantum dots enhance the quality of perovskite polycrystalline films and charge transport for solar cells[J].Journal of Colloid and Interface Science,2023,646:517-528.

[26] Mousavi S M,Hashemi S A,Kalashgrani M Y,et al.Biomedical applications of an ultra-sensitive surface plasmon resonance biosensor based on smart MXene quantum dots (SMQDs)[J].Biosensors,2022,12(9):743.

[27] Liu W W,Luo D,Zhang M W,et al.Engineered MXene quantum dots for micro-supercapacitors with excellent capacitive behaviors [J].Nano Energy,2024,122:109332.

[28] Mousavi S M,Kalashgrani M Y,Binazadeh M,et al.Recent advancements in smart MXene quantum dot-based nanosystems for immunomodulatory and effective cancer treatment[J]. Materials Today Chemistry,2024,38:102097.

[29] Zhou L,Wu F M,Yu J H,et al.Titanium carbide ($Ti_3C_2T_x$) MXene:a novel precursor to amphiphilic carbide-derived graphene quantum dots for fluorescent ink,light-emitting composite and bioimaging[J].Carbon,2017,118:50-57.

[30] Guan C,Yue X Y,Fan J J,et al.MXene quantum dots of Ti_3C_2: properties, synthesis, and energy-related applications[J].Chinese Journal of Catalysis,2022,43(10):2484-2499.

[31] Cheng Y H,Jiang B W,Chaemchuen S,et al.Advances and challenges in designing MXene quantum dots for sensors[J].Carbon Neutralization,2023,2(2):213-234.

[32] Zhu Y L,Feng L L,Zhao R X,et al.Review of MXene-derived quantum dots for cancer theranostics[J].ACS Applied Nano Materials,2024,7(3):2546-2574.

[33] Safaei M,Shishehbore M R.Energy conversion and optical applications of MXene quantum dots[J].Journal of Materials Science, 2021,56(32):17942-17978.

[34] Elemike E E,Adeyemi J,Onwudiwe D C, et al. The future of energy materials: a case of MXenes-carbon dots nanocomposites [J].Journal of Energy Storage,2022,50:104711.

[35] Gupta S K,Mao Y B.Recent developments on molten salt synthesis of inorganic nanomaterials: a review[J].The Journal of Physical Chemistry C,2021,125(12):6508-6533.

[36] Cheng H, Ding L X, Chen G F, et al. Molybdenum carbide nanodots enable efficient electrocatalytic nitrogen fixation under ambient conditions [J]. Advanced Materials, 2018, 30 (46): 1803694.

[37] Mohanty B, Giri L, Jena B K. MXene-derived quantum dots for energy conversion and storage applications[J]. Energy & Fuels, 2021, 35(18): 14304-14324.

[38] Li T, Liu G Q, Yao G Y, et al. Ligand-triggered MXene quantum dots with tunable work function as anode and cathode interlayers for organic solar cells[J]. Solar RRL, 2024, 8(13): 2400270.

[39] Lin J, Xu J J, Zhao W, et al. *In situ* synthesis of MoC_{1-x} Nanodot@Carbon hybrids for capacitive lithium-ion storage[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019, 11(22): 19977-19985.

[40] Liu M W, Bai Y X, He Y, et al. Facile microwave-assisted synthesis of Ti3C2 MXene quantum dots for ratiometric fluorescence detection of hypochlorite[J]. Microchimica Acta, 2021, 188: 15.

[41] Bai Y X, He Y, Wang M M, et al. Microwave-assisted synthesis of nitrogen, phosphorus-doped Ti_3C_2 MXene quantum dots for colorimetric/fluorometric dual-modal nitrite assay with a portable smartphone platform[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2022, 357: 131410.

[42] Wan J, Huang L, Wu J B, et al. Rapid synthesis of size-tunable transition metal carbide nanodots under ambient conditions[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2019, 7(24): 14489-14495.

[43] Chen Z X, Zhao C, Zhou X P, et al. A review of top-down strategies for the production of quantum-sized materials[J]. Small Science, 2023, 3(12): 2300086.

[44] Kong W H, Niu Y S, Liu M L, et al. One-step hydrothermal synthesis of fluorescent MXene-like titanium carbonitride quantum dots[J]. Inorganic Chemistry Communications, 2019, 105: 151-157.

[45] Xue Q, Zhang H J, Zhu M S, et al. Photoluminescent Ti_3C_2 MXene quantum dots for multicolor cellular imaging[J]. Advanced Materials, 2017, 29(15): 1604847.

[46] Gou J Y, Zhao L, Li Y, et al. Nitrogen-doped Ti_2C MXene quantum dots as antioxidants[J]. ACS Applied Nano Materials, 2021, 4(11): 12308-12315.

[47] Huang Y M, Wang X L, Zhang H H, et al. Nb_2C MXene quantum dots modulate built-in electric field within heterostructures for efficient solar-to-H_2O_2 conversion from seawater[J]. Applied Catalysis B: Environment and Energy, 2025, 371: 125262.

[48] Feng Y F, Zhou F R, Deng Q H, et al. Solvothermal synthesis of *in situ* nitrogen-doped Ti_3C_2 MXene fluorescent quantum dots for selective Cu^{2+} detection[J]. Ceramics International, 2020, 46(6): 8320-8327.

[49] Xu G F, Niu Y S, Yang X C, et al. Preparation of $Ti_3C_2T_x$ MXene-derived quantum dots with white/blue-emitting photoluminescence and electrochemiluminescence[J]. Advanced Optical Materials, 2018, 6(24): 1800951.

[50] Yang J W, Chen L L, Qi J, et al. Acid-assisted ultrasonic preparation of nitrogen-doped MXene quantum dots for the efficient fluorescence "off-on-off" detection of Zn(Ⅱ) in water and oxalic acid in vegetables[J]. Food Chemistry, 2024, 430: 137007.

[51] Yu X H, Cai X K, Cui H D, et al. Fluorine-free preparation of titanium carbide MXene quantum dots with high near-infrared photothermal performances for cancer therapy[J]. Nanoscale, 2017, 9(45): 17859-17864.

[52] Sharbirin A S, Akhtar S, Kim J. Light-emitting MXene quantum dots[J]. Opto-Electronic Advances, 2021, 4(3): 200077.

[53] Neupane G P, Wang B W, Tebyetekerwa M, et al. Highly enhanced light-matter interaction in MXene quantum dots-monolayer WS_2 Heterostructure[J]. Small, 2021, 17(11): 2006309.

[54] Singh R, Kumar S, Bera S, et al. Trends in using fluorescent MXene quantum dots for selective detection and bioimaging applications: a review[J]. ACS Applied Nano Materials, 2023, 6(21): 19526-19550.

[55] Alijani H, Rezk A R, Khosravi Farsani M M, et al. Acoustomicrofluidic synthesis of pristine ultrathin $Ti_3C_2T_z$ MXene nanosheets and quantum dots[J]. ACS Nano, 2021, 15(7): 12099-12108.

[56] Li X S, Liu F, Huang D P, et al. Nonoxidized MXene quantum dots prepared by microexplosion method for cancer catalytic therapy[J]. Advanced Functional Materials, 2020, 30(24): 2000308.

[57] Tang R, Zhou S J, Li C X, et al. Janus-structured co-Ti_3C_2 MXene quantum dots as a Schottky catalyst for high-performance photoelectrochemical water oxidation[J]. Advanced Functional Materials, 2020, 30(19): 2000637.

[58] Das Mahapatra A, Kumar S, Chauhan P S, et al. Large area graphene-MXene quantum dot based high performance photochargeable supercapacitor[J]. ACS Applied Energy Materials, 2024, 7(14): 5801-5810.

[59] Ding L, Zeng S W, Zhang W Y, et al. Nitrogen-doped Ti_3C_2 MXene quantum dots/1D CdS nanorod heterostructure photocatalyst of highly efficient hydrogen evolution[J]. ACS Applied Energy Materials, 2022, 5(9): 11540-11552.

[60] Chen X, Xu W, Ding N, et al. Dual interfacial modification engineering with 2D MXene quantum dots and copper sulphide nanocrystals enabled high-performance perovskite solar cells[J]. Advanced Functional Materials, 2020, 30(30): 2003295.

[61] Yuan Y J, Jiang L, Li X, et al. Ultrafast shaped laser induced synthesis of MXene quantum dots/graphene for transparent supercapacitors[J]. Advanced Materials, 2022, 34(12): 2110013.

[62] Nie Y X, Liang Z H, Wang P L, et al. MXene-derived quantum Dot@Gold nanobones heterostructure-based electrochemiluminescence sensor for triple-negative breast cancer diagnosis[J]. Analytical Chemistry, 2021, 93(51): 17086-17093.

[63] Liu M W, He Y, Zhou J, et al. A"naked-eye" colorimetric and ratiometric fluorescence probe for uric acid based on Ti_3C_2 MXene quantum dots[J]. Analytica Chimica Acta, 2020, 1103: 134-142.

[64] Li M X, Li Z R, Wang P L, et al. A novel bimetallic MXene derivative QD-based ECL sensor for miRNA-27a-3p detection[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2023, 228: 115225.

[65] Zou Y C, Shi Y Q, Wang T X, et al. Quantum dots as advanced nanomaterials for food quality and safety applications: a comprehensive review and future perspectives[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2024, 23(3): e13339.

[66] Deng C, Yu Z C, Liang F Y, et al. Surface nano-engineering of cellulosic textiles for superior biocidal performance and effective bacterial detection[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 473: 145492.

[67] Wan M J, Jimu A S, Yang H L, et al. MXene quantum dots enhanced 3D-printed electrochemical sensor for the highly sensitive detection of dopamine [J]. Microchemical Journal, 2023, 184: 108180.

[68] Lin C X, Qiu C B, Wang Y N, et al. MXene quantum dots for ratiometric fluorescence detection of a *Bacillus anthracis* biomarker [J]. Sensors & Diagnostics, 2024, 3(3): 431-439.

[69] Rafieerad A, Yan W A, Sequiera G L, et al. Application of Ti_3C_2 MXene quantum dots for immunomodulation and regenerative medicine [J]. Advanced Healthcare Materials, 2019, 8 (16): 1900569.

[70] Qiu P, Li J Y, Zhang L, et al. Polyethyleneimine-coated MXene quantum dots improve cotton tolerance to Verticillium dahliae by maintaining ROS homeostasis [J]. Nature Communications, 2023, 14: 7392.

[71] Qin M, Zhang X M, Ding H Y, et al. Engineered probiotic bioheterojunction with robust antibiofilm modality via "eating" extracellular polymeric substances for wound regeneration [J]. Advanced Materials, 2024, 36(35): 2402530.

[72] He W J, Jin Y, Wang B P, et al. Multifunctional nanocomposites based on graphite-phase carbon nitride quantum dot-silver nanospheres for combined photothermal-photodynamic anti-tumor therapy [J]. New Journal of Chemistry, 2024, 48(9): 3957-3965.

[73] Rafieerad A, Yan W A, Alagarsamy K N, et al. Fabrication of smart tantalum carbide MXene quantum dots with intrinsic immunomodulatory properties for treatment of allograft vasculopathy [J]. Advanced Functional Materials, 2021, 31(46): 2106786.

[74] Yang Z, Wang J L. Enhanced photocatalytic degradation of emerging contaminants using $Ti_3C_2T_x$ MXene-supported CdS quantum dots [J]. Langmuir, 2023, 39(11): 4179-4189.

[75] Xue Q, Meng W Q, Li Y, et al. Tailored design of polyamide nanofiltration membrane with small-sized MXene quantum dots for promoting water transport [J]. Journal of Membrane Science, 2024, 699: 122656.

[76] Wang A Q, Wen Y K, Zhu H D, et al. Oxygen vacancy mediated photocatalysis of Ti3C2 MXene quantum dots/$W_{18}O_{49}$ hybrid membrane for peroxymonosulfate-enhanced oxidation degradation [J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 496: 154264.

[77] Cheng Y H, Shen P, Li X C, et al. Synergistically enhanced peroxidase-like activity of Fe_3O_4/Ti_3C_2 MXene quantum dots and its application in colorimetric determination of Cr (Ⅵ) [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2023, 376: 132979.

[78] Gu J J, Lu X C, Li G J, et al. Beyond carbon dots: intrinsic reducibility in Ti_3C_2 MXene quantum dots induces ultrasensitive fluorescence detection and scavenging of Mn(Ⅶ) [J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 467: 143445.

[79] Zhang T, Dong C S, Zhang L Z. Solar-assisted-self-healing N-doped MXene quantum dots-based membrane with protein resistance for seawater desalination [J]. Environmental Science & Technology, 2023, 57(27): 9996-10007.

[80] Gao K X, Hou L A, An X Q, et al. BiOBr/MXene/gC_3N_4 Z-scheme heterostructure photocatalysts mediated by oxygen vacancies and MXene quantum dots for tetracycline degradation: process, mechanism and toxicity analysis [J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2023, 323: 122150.

[81] Huang Z Y, Huang W L, Xu C H, et al. Bias-switchable volatile and nonvolatile multifunctional photoelectric memristors based on MXene quantum dots for efficient selective encryption-decryption and recognition [J]. Advanced Functional Materials, 2025, 35 (33): 2502211.

[82] Zhao Z L, Liu X, Liu Y, et al. Ultrasensitive gas sensor of mixed-dimensional heterostructures combining borophene and BC_2N quantum dots: enhanced detection through binary cooperative effects [J]. Angewandte Chemie International Edition, 2025, 64 (18): e202501550.

[83] Sun J Z, Du H, Chen Z J, et al. MXene quantum dot within natural 3D watermelon peel matrix for biocompatible flexible sensing platform [J]. Nano Research, 2022, 15(4): 3653-3659.

[84] Li S C, Barnard A S. Inverse design of MXenes for high-capacity energy storage materials using multi-target machine learning [J]. Chemistry of Materials, 2022, 34(11): 4964-4974.

[85] Shrestha S, Barvenik K J, Chen T L, et al. Machine intelligence accelerated design of conductive MXene aerogels with programmable properties [J]. Nature Communications, 2024, 15: 4685.

基金项目：湖南省教育厅优秀青年项目(24B0519)

收稿日期：2025-05-09；**录用日期**：2025-06-23

通讯作者：王武(1989—)，男，讲师，博士，主要从事低维材料的可控构筑设计研究，联系地址：湖南工业大学崇仁楼 107-1(412007)，E-mail: cvery@hut.edu.cn

(本文责编：解　宏)